燃料棒 X 射线穿透特性与辐射防护条件探究

黄帆，陈凯，李平，王梦蝶，金甜甜

（中核建中燃料棒有限公司 四川 宜宾 644000）

摘要：燃料棒是核反应堆的核心部件之一，其结构稳定性直接影响着核反应堆的运行稳定性，对燃料棒结构与缺陷的无损检测对保障核安全至关重要。采用基于 X 射线的无损检测与探伤技术，如数字化射线摄影（Digital Radiography, DR）和计算机断层成像技术（Computed Tomography, CT）等，对燃料棒进行结构与缺陷无损检测，能够提供较高的分辨力和缺陷检出能力，有望解决燃料棒的高水平质量控制问题。针对燃料棒的 X 射线探伤,本文首先分析了 X 射线穿透物质时与物质中的原子发生相互作用的物理过程，然后基于朗伯-比尔定律定量分析了 X 射线强度在燃料棒中的衰减情况，据此明确了 X 射线能量与其对燃料棒穿透能力的关系，即应选择能量不低于 200 keV 的 X 射线可满足该型燃料棒焊缝检测需求。另外，由于燃料棒 X 射线无损探伤需要进行辐射防护，本文针对上述 X 射线源的能量，还分析了辐射防护的铅板的厚度选择情况，基于保护，厚度应选择至少 20㎜。综上，本文明确了针对燃料棒实现无损检测与探伤的 X 射线穿透特性，并分析了其辐射防护条件，对燃料棒生产实践过程具有指导意义。

关键词：X 射线探伤；无损检测；燃料棒；朗伯-比尔定律

Research of X-Ray Penetration Characteristics and Radiation Protection Conditions of Fuel rods

HUANG Fan，CHEN Kai，LI Ping，WANG Meng-die，JIN Tian-tian

（CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd, Yibin 644000, China）

Abstract：The fuel rod are one of the core components of a nuclear reactor, and their structural stability directly affects the operational stability of the reactor. Non-destructive testing (NDT) of the structure and defects of the fuel rod is crucial for ensuring nuclear safety. Traditional NDT methods such as ultrasound and eddy current testing have certain limitations. X-ray-based NDT and inspection techniques, such as Digital Radiography (DR) and Computed Tomography (CT), offer higher resolution and better defect detection capabilities for inspecting the structure and defects of the fuel rod. These methods are expected to address high-level quality control issues for the fuel rod. This paper focuses on X-ray inspection for the non-destructive testing of pressurized the fuel rod. It investigates the relationship between X-ray energy and its penetration ability for the fuel rod, clarifying the feasibility of achieving high-precision inspection with X-ray testing

technology, and analyzes its radiation protection requirements.

Key words：X-ray inspection; The fuel rod; Non-destructive testing; Lambert-Beer law

1 引言

燃料棒作为核反应堆的核心单元，承载着核反应堆内的核裂变反应，并将由裂变释放的热量传导给冷却剂[1][2]。由于其需在高温、高压和辐射环境中长时间运行，燃料棒在服役期会经历一系列复杂的物理、化学变化，包括热膨胀、辐照退火、表面腐蚀、裂纹扩展、内气压变化等[3][4]。这些变化可能导致燃料棒发生结构性损伤，如破裂、膨胀、泄漏等，此类损伤如果没有及时发现，将会严重影响核反应堆的安全性和稳定性[5][6]。与此同时，燃料棒的结构与内部缺陷还可能对周围环境和设备造成严重影响，甚至导致核事故的发生。

基于 X 射线的无损检测和探伤技术作为代表性无损检测技术，可以实现高精度的成像，已广泛应用于工业中的零部件的内部结构分析和材料表征，这种技术能够提供物体内部的信息如气孔、裂纹、缺陷等，该过程无需破坏被检测物体，具有非破坏性和高精度的特点[7]。将 X 射线探伤技术应用于燃料棒的质量控制，不仅能够提高燃料棒的使用寿命，降低事故风险，还能在燃料管理、核电站维护和运行优化等方面提供重要数据支持。例如，通过定期的无损检测，可以优化燃料更换周期、调整反应堆功率分布、以及实时监控燃料棒的健康状态，进而提高核能的利用效率和经济性。此外，无损检测还能减少维修和停机时间，降低运行成本，因此，它在确保核电站安全运行、提升核能产业竞争力方面，起着至关重要的作用[8]。

本文针对燃料棒的无损检测，开展基于 X 射线探伤的可行性的分析，首先研究了 X 射线能量与其对燃料棒穿透能力的关系，明确了 X 射线探伤技术对燃料棒实现高精度检测具备可行性，此外，还分析了其采用 X 射线探伤技术的辐射防护条件。

2 X 射线探伤基本过程

基于 X 射线的无损检测和探伤装置的基本结构为如下图 1 所示，由射线源、被测物体和探测器（或胶片）三个核心单元组成，其基本检测过程为射线源发出 X 射线，该射线穿透被测物体到达探测器形成透射图像。在 X 射线透射过程中，被测物体不同部位结构和材料的差异导致其对 X 射线吸收程度不同，而探测器对应位置探测单元感受到的射线强度与之对应，经过图像处理即可得到被测物体内部细节信息。

与其他检测方法不同，X 射线探伤在对燃料棒进行结构与内部缺陷检测时，具有显著优势，主要体现在以下方面：首先，X 射线探伤是非破坏性的，可对待使用的燃料棒进行全检。其次，采用 DR 技术可实现快速无损探伤，而采用高分辨 CT 无损检测的能够精确捕捉微小缺陷等结构细节，适用于复杂的内部结构分析。因此，X 射线探伤技术已广泛应用于燃料棒的无损检测和质量控制。

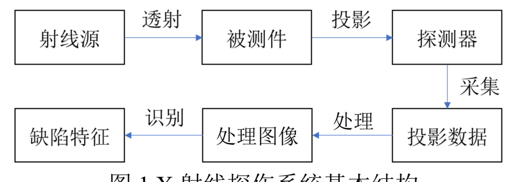


图 1 X 射线探伤系统基本结构

3 X 射线穿透特性分析

3.1 X 射线对燃料棒的穿透机理分析

为保证对燃料棒的良好检测效果，首先需要评估 X 射线对其的穿透能力。这一评估涉及到射线

在燃料棒内部的传播与衰减情况，包括不同射线电压和电流对穿透深度和图像质量的影响。只有在明确了解射线穿透能力的基础上，才能确保 X 射线透射成像能够有效揭示燃料棒内部的结构特征、缺陷或其他关键问题。因此，研究 X 射线与燃料棒相互作用的机理，以及不同条件下射线的衰减模式，是确保 X 射线探伤实现对燃料棒无损检测良好效果的关键环节。

当 X 射线穿透物质时，它与物质中的原子发生相互作用，主要通过以下几种方式：

（1）光电效应：光电效应是 X 射线与物质相互作用的主要方式之一。在这一过程中，X 射线光子被物质中的原子吸收，导致原子内的电子逸出；

（2）康普顿散射：康普顿散射是 X 射线与物质中自由或弱束缚的电子相互作用的另一种主要方式。在这个过程中，X 射线光子与物质中的电子碰撞并使其逸出，同时光子的能量被部分转移给电子。康普顿散射对高能 X 射线的影响较大，散射后的 X 射线具有较低的能量，且传播方向发生偏转。康普顿散射是 X 射线与物质发生相互作用时造成衰减的一个重要原因；

（3）电子对生成：电子对生成是一种仅在 X 射线光子能量极高（大于 1.022 MeV）时发生的现象。在这一过程中，X 射线光子在原子核电场的作用下，能量转化为一对电子和正电子。这类相互作用发生的概率随着 X 射线能量的增大而增加，但只有在极高能量下才显著；

（4）汤姆孙散射、瑞利散射：此二类散射是 X 射线与物质中原子核或电子的弹性散射，其中，汤姆孙散射是康普顿散射在低能量区的近似。汤姆孙散射和瑞利散射不涉及能量损失[9][10]。

通过上述方式，X 射线与燃料棒中的物质相互作用，该过程中 X 射线发生衰减和能量转移，从而影响 X 射线的透射成像及其质量。通常采用朗伯-比尔定律表征 X 射线穿透过程中的吸收和衰减[11]。该过程的核心是：X 射线穿透物质后，其强度会随着穿透深度的增加而衰减，衰减的程度受物质的原子组成和密度的影响。

根据朗伯-比尔定律，X 射线强度在物体中的衰减规律如下式所示[11]：

$$I = I_0 e^{-\mu T} \tag{1}$$

其中，I_0 为入射光子强度，T 为材料厚度，μ为所穿透物质的线性衰减系数。

为了更直观地和物质的原子相对应，通常使用质量衰减系数μ_m 来表征物质对光子的吸收特性：

$$\mu_m = \mu / \rho \tag{2}$$

其中ρ为物质的密度。

对于一种特定元素，其质量衰减系数和 X 射线的能量相关，其具体数值可以在公开数据库中查询。XCOM 数据库是美国国家标准与技术研究院（NIST）开发的一种权威工具，用于计算 X 射线在元素、化合物及混合物中的相互作用系数。该数据库涵盖从 1 keV 到 100 GeV 的能量范围，能够提供质量衰减系数及其对应的分量数据，包括光电效应、康普顿散射和电子对生成效应等主要相互作用机制[12]。在本研究中，XCOM 数据库的数据被用于计算燃料棒中射线穿透和衰减特性，为探伤无损检测的可行性分析提供了精确的理论支持。

而对于本文所讨论的燃料棒，其是由多种元素组成的混合物。对于混合物的质量衰减系数，其是各自元素的质量衰减系数与其质量分数的乘积之和[11]：

$$\mu_m = \sum_{i=1}^{n} \mu_{mi} w_i \tag{3}$$

其中，μ_{mi} 是混合物所含元素各自的质量衰减系数，w_i 是混合物所含元素各自的质量分数。

将混合物的质量衰减系数代入式，可到：

$$I = I_0 e^{-\mu T} = I_0 e^{-T\rho \sum_{i=1}^{n} \mu_{mi} w_i} \tag{4}$$

其中 ρ 是被测物的密度，与质量衰减系数相乘即可得到被测物的线性衰减系数。

但是在实际应用中，被测工件往往是由多种混合物拼接在一起的，想要获取整个被测件的各元素质量分数和整体的密度很困难，而被测件各成分各自的元素组成和密度较易获取，因此可以用被测件各成分各自的元素组成和密度代替被测件的各元素质量分数和整体的密度。

不妨设被测件的形状规则（即 X 射线穿透被测件各组分的穿透截面面积始终一定），在式中引入被测件的穿透截面面积 S，则有：

$$I' = I_0 e^{-ST\rho \sum_{i=1}^{n} \mu_{mi} w_i} \tag{5}$$

进而有：

$$I' = I_0 e^{-m \sum_{i=1}^{n} \mu_{mi} w_i} = I_0 e^{-\sum_{i=1}^{n} \mu_{mi} S T_i \rho_i} \tag{6}$$

最终得到：

$$I = I_0 e^{-\sum_{i=1}^{n} \mu_{mi} T_i \rho_i} \tag{7}$$

由上式可知，在保证被测件各组分穿透截面面积一定时，可利用被测件各组分各自的厚度和密度求得被测件整体的残余射线强度，从而判断不同能量的 X 射线对其穿透特性。由此，即可分析 X 射线对燃料棒的穿透特性。

3.2　X 射线对燃料棒穿透特性分析

根据燃料棒的结构特性，本文利用 3.1 节结论分析不同的 X 射线源电压在燃料棒各个区域的穿透特性。燃料棒的端塞与包壳管焊接后，其焊缝的质量需要严格控制。下面，针对燃料棒焊缝区域和填充芯块区域进行 X 射线对燃料棒穿透特性分析。

燃料棒呈圆柱体，其直径约为 9.5 mm，主要有锆合金包壳，内部填充的 UO_2 芯体及两端的端塞组成。其中，包壳层壁厚约为 0.6 mm，芯体层厚度约为 8 mm。端塞与包壳管的焊缝处可简化为直径 9.5 mm 的纯锆圆柱体；而元件的填充芯体区域，其元素组分可近似为 Zr 的体积分数为 15.51%，UO_2 的体积分数为 84.49%。

在上述条件下，通过查阅 XCOM 即可获得各层在不同射线能量的 X 射线下的质量衰减系数。下图 2、图 3 展示了燃料棒的焊缝处和填充芯体区域的质量衰减系数。

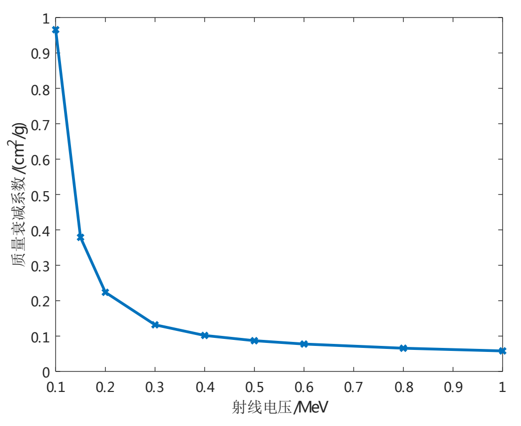


图 2 燃料棒的焊缝处在不同能量 X 射线下的质量衰减系数

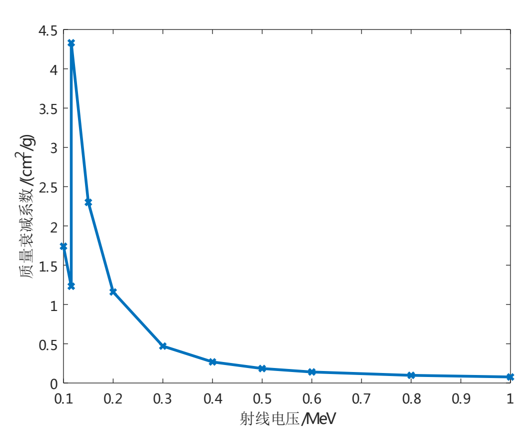
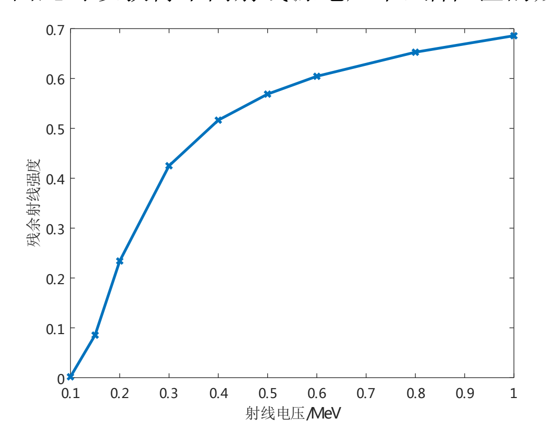


图 3 燃料棒填充芯体区域在不同能量 X 射线下的质量衰减系数

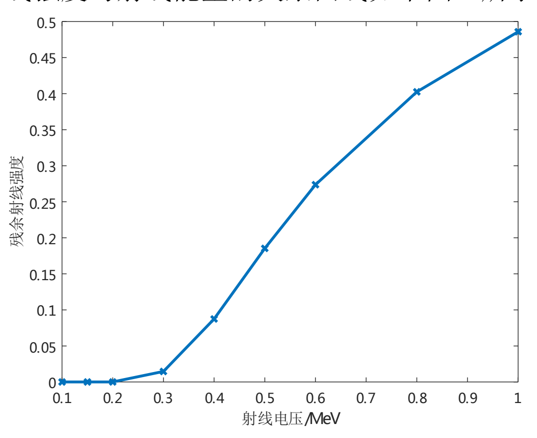
根据前文的分析，连续穿过多层物质后的残余射线强度，可由朗伯-比尔定律计算得到：

$$I = I_0 e^{-\sum_{i=1}^{n} \mu_i T_i} \tag{8}$$

由此可以获得不同射线源电压下，活性区的残余射线强度与射线能量的关系曲线如下图 4 所示。



a）不同能量 X 射线穿透端塞区域（主要成分为锆）后的残余射线强度



b）不同能量 X 射线穿透燃料区域后的残余射线强度

图 4 不同能量 X 射线穿透不同燃料组分活性区后的残余射线强度

根据朗伯-比尔定律，X 射线的穿透能力与管电压的大小有关。射线源的管电压代表着其所能发出的最大 X 射线能量值，因此随着管电压的增大，穿透能力随之增强[13]。一般认为穿透率不低于 20%即可获得较好的成像质量。结合燃料棒检测实际需求，选择能量不低于 200keV 的 X 射线可满足焊缝处检测需求。实际生产过程中，考虑到长期使用的稳定性和效率，采用最高电压为 320kV 的 X 射线装置。

4 X 射线辐射防护条件分析

前文通过计算穿过燃料棒后的残余射线强度，分析了 X 射线穿透能力与其能量之间的关系，为射线源能量的选择提供了理论依据。然而，X 射线存在辐射，为保证操作人员的安全并减小对环境的影响，需采取辐射防护措施，一般采用铅质外壳实现。铅的辐射屏蔽效果与 X 射线的能量成反比[14-17]。中高能 X 射线（如 200 keV）需要较厚的铅屏蔽来有效减少辐射强度。根据上文推导的式，进行防护铅外壳的厚度分析。针对通常使用的 200 kV X 射线源，计算可知射线穿透厚度为 10mm 铅板后残余强度约为 1%，穿透厚度为 15mm 铅版后残余强度约为 0.1%。

实际在使用 200 kV X 射线源时，常见的防护铅外壳厚度范围通常为 10 mm 到 15 mm。有些特定情况下，可能需要更厚的铅屏蔽，尤其是当需要进一步降低辐射泄漏或处理高剂量要求的场合时，厚度可能会达到 20 mm 或更厚。在设计 X 射线探伤设备的防护铅外壳时，需要遵循国际辐射防护标准，如国际辐射防护委员会（ICRP）和国际电工委员会（IEC）的相关规范[18-20]。

5 结论

根据射线衰减和穿透的理论分析可发现，大约 200 keV 能量的 X 射线具备足够的穿透能力，能够穿透燃料棒中的高密度金属包壳等材料。为保证现场人员安全，设备所用防护铅外壳厚度至少 20 mm。

参考文献

[1] 郑赛春, 张小刚, 张凡, 汪绍兴, 郭梦雅. 管型核燃料元件芯体定位检测系统[J]. 无损检测, 2024, 46(7): 12 ‐ 18.

[2] 李冠兴. 研究试验堆燃料元件制造技术[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

[3] Frost B R T. Nuclear Fuel Elements: design, fabrication and performance[M]. Elsevier, 2013.

[4] 崔尧, 张向阳, 何高魁. 核燃料组件无损检测探测系统设计[J]. 同位素, 2015, 28(3): 167－170.

[5] 张小刚, 俞东宝, 汤慧, 朱永利, 葛腾. 板型核燃料元件包壳内芯体边界识别与定位检测系统[J]. 无损检测, 2023, 45(1): 58-61+71.

[6] Choi H-J, Chung Y S, Kim H, Kwak S-W, Chung H, Baek H-K, Shin J, Chung Y H, Min C H. Performance evaluation of Yonsei Single-photon Emission Computed Tomography (YSECT) for partial-defect inspection within PWR-type spent nuclear fuel[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(11): 4471–4480.

[7] Parker H M O, Joyce M J. The use of ionising radiation to image nuclear fuel: A review[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 85: 297–318.

[8] Katsuyama K, Nagamine T, Matsumoto S, Sato S. High energy X-ray CT study on the central void formations and the fuel pin deformations of FBR fuel assemblies[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 255(2): 365–372.

[9] 蔡雅雯, 王祥科. 核辐射探测技术及器件的研究进展[J]. 分析测试学报, 2024, 43(10): 1512－1524.][Marghany M. Nonlinear Ocean Dynamics: Synthetic Aperture Radar[M]. Elsevier, 2021.

[10] X 射线与物质的相互作用[J].工学学报,1979,(03):93-115.

[11] 李哲夫, 薛向欣. 含硼矿物及环氧树脂的光子质量衰减系数[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(9): 1147－1152.

[12] Berger M J, Hubbell J H. XCOM: Photon cross sections on a personal computer[R]. National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). Center for Radiation Research,1987[2024-11-29].

[13] 汤雅惠. X 射线检测管道壁厚系统及检测方法[D]. 天津大学,2023.

[14] 陈钧.钢结构 X 射线检测工作的辐射防护分析[J].工程技术研究,2023,8(20):42-44.

[15] 李大伟,纪云龙,周红梅,等.某设备所致脉冲 X 射线辐射场测量与防护评价[J].中国辐射卫生,2020,29(01):53-56.

[16] 陆小茜,李玲玲.X 射线探伤装置在特殊屏蔽条件下的辐射防护与安全评价[J].广东化工,2019,46(13):40-41+48.

[17] 郑程.工业 X 射线探伤装置辐射屏蔽与防护研究[J].中国战略新兴产业,2018,(16):180+182.

[18] 王赛男,邓晨阳.工业 X 射线装置辐射防护与环境影响分析[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告（第八卷）中国核学会 2023 年学术年会论文集核化工 辐射防护.中核矿业科技集团有限公司;中核战略规划研究总院;,2023:5.

[19] 胡健.X 射线辐射防护标准法规探究[J].大众标准化,2022,(02):114-115+118.

[20] 贾鹏军,刘琰,姚欢,等.X 射线探伤辐射防护与安全管理探讨[J].内蒙古石油化工,2018,44(11):52-58.

黄帆，男，1987.11—，2011 年 6 月毕业于四川理工学院，机械设计制造及其自动化，学士，高级工程师，879967686@qq.com。